ارزیابی ریزساختاری تثبیت حرارتی خاک‌های مارنی مطالعه موردی: مارن غرب بندرعباس

محمد امیری[1*]، مسعود دهقانی[1]، مائده پاپی[2]

۱- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه هرمزگان

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران، دانشگاه هرمزگان

تاریخ دریافت [--/--/--] **تاریخ پذیرش** [--/--/--]

چکیده

مارن‌ها از جمله نهشته‌های رسوبی هستند که به طور کلی از کانی‌های رسی و کربنات کلسیم به نسبت‌های بین ۳۵٪ تا ۶۵٪ تشکیل شده‌اند. وجود کانی‌های رسی در خاک‌های مارن به مقدار قابل توجهی در کاهش شاخص دوام و درنتیجه وارفتگی خاک مارن نقش دارد. از این‌رو تثبیت خاک‌های مارنی حائز اهمیت است. از سوی دیگر وجود کربنات به عنوان یکی از اجزای اصلی خاک‌های مارنی در رفتار مهندسی خاک، به شدت تاثیرگذار است. حرارت چه در حالت گذرا و چه در حالت پایدار موجب تغییر در مشخصات فیزیکی، مکانیکی و ریزساختاری خاک‌ها به ویژه خصوصیات مهندسی خاک‌های رسی می‌شود. بر این اساس هدف از این پژوهش بررسی تاثیر حرارت بر پارامترهای مقاومتی خاک‌های مارنی از منظر ریزساختاری است. در پژوهش حاضر تاثیر حرارت بر فرایند رفتاری خاک مارنی با استفاده از آزمایش‌های درشت‌ساختار (مقاومت فشاری محدود نشده، حدود اتربرگ، دانه-بندی، وارفتگی، جذب آب و انقباض خطی) و آزمایش‌های ریزساختاری (pH و پراش اشعه ایکس(XRD)) مورد ارزیابی قرار گرفته است. بدین منظور نمونه‌ها در معرض سطوح حرارتی (۲۵ تا ۹۰۰ درجه سلسیوس) قرار گرفته است. آزمایش‌ها با تاکید بر تغییرات ریزساختاری خاک مارن در دماهای معین و تاثیر تغییرات حرارت بر خصوصیات مکانیکی و مقاومتی خاک از منظر ریزساختاری انجام شده است. بر اساس نتایج بدست آمده خاک‌های مارنی در دمای ۷۰۰ درجه سلسیوس دارای بیشترین مقاومت فشاری به میزان ۲۷/۶۹ کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع و دوام در مقابل رطوبت هستند.

واژگان کلیدی: مارن، تثبیت حرارتی، مقاومت فشاری، XRD.

۱. مقدمه

خاک‌های مسئله‌دار به عنوان یکی از عوامل تخریب سازه‌های خاکی به شمار می‌روند. خاک‌های مارن حاوی مواد معدنی رس و کربنات در نسبت‌های مختلف از ۳۵٪ تا ۶۵٪ هستند [۱-۳]. نهشته‌های مارنی به دلیل ماهیت ساختمانی، نظیر وجود ذرات تخریبی و مواد شیمیایی (کربنات کلسیم، ژیپس، انیدریت و نمک) نسبت به سایر نهشته‌ها از فرسایش‌پذیری بیشتری برخوردارند. پالی-گورسکایت و سپیولایت کانی‌های رسی تشکیل دهنده خاک مارن هستند، که منجر به بی‌ثباتی، کاهش ظرفیت باربری و تورم در خاک می‌شوند [۱-۴]. فرسایش داخلی و پایداری خاک‌های مارنی به عوامل همچون ۱) ویژگی‌های

فیزیکی و شیمیایی ترکیبات تشکیل دهنده خاک؛ ۲) حساسیت و پلاستیسیته خاک، خصوصا محتوای اسمکتیت؛ ۳) محتوای کربنات خاک که در کوتاه مدت ممکن است باعث ایجاد چسبندگی در خاک‌ها و در دراز مدت موجب اثر سیمان شدگی و تغییر ساختار خاک می‌شود؛ و ۴) نسبت تخلخل متفاوت در نمونه‌ها وابسته است [۱-۳، ۵].

مارن‌ها به طور کلی با معیارهای مشابه طبقه‌بندی خاک رس و سیلت طبقه‌بندی شده‌اند در حالی که حضور کربنات‌ها در نظر گرفته نشده است. اگرچه، حضور کربنات‌ها در این خاک‌ها برای رفتار ژئوتکنیکی آنها بسیار مهم به نظر می‌رسد [۳]. لاماس و همکاران (۲۰۰۲) مشخصات خصوصیات ژئوتکنیکی مارن در اهداف مهندسی عمران به عنوان عملکرد محتوای کربناته (درصد کربنات) را پیشنهاد کردند [۱]. آنالیز خواص مهندسی و رفتار خاک‌های حاوی کربنات نیاز به اطلاعات صحیح در مورد مقدار کربنات دارد. نتایج مطالعات انجام شده پژوهشگران، رابطه قوی بین افزایش پلاستیسیته و واکنش-پذیری با محتوای کربنات و رس در مارن طبیعی را نشان می‌دهد [۶-۷].

حرارت چه در حالت گذرا و چه در حالت پایدار موجب تغییر در مشخصات فیزیکی، مکانیکی و ریزساختاری خاک‌ها به ویژه خصوصیات مهندسی خاک-های رسی می‌شود و میزان این تغییرات تابعی از نوع کانی-های موجود در خاک، ترکیبات شیمیایی، دانسیته و درصد رطوبت است [۸-۹]. خروج آب و تشکیل کانی‌های جدید دو واکنش اصلی است که بر اثر اعمال حرارت انجام می-شود. خروج آب شامل دو مرحله، دی‌هیدراسیون (خروج آب حفره‌ای، جذبی و بین‌لایه‌ای) و دی‌هیدروکسیلاسیون (خروج یون هیدروکسیل از ساختار کریستالی کانی رسی) می‌شود [۱۰]. به طور کلی با توجه به نوع کانی رسی، دی-هیدراسیون بین ۱۰۰ تا ۲۰۰ درجه سلسیوس و دی-هیدروکسیلاسیون بین ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ درجه سلسیوس رخ می‌دهد. اعمال حرارت بین ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ درجه سلسیوس باعث تخریب کانی‌ها و تشکیل سیلیکات‌های کریستالی جدید می‌شود [۱۲،۱۱]. همچنین با اعمال حرارت بیشتر، خاک ذوب شده و مصالح گداخته شکل می‌گیرد. از حرارت به طور کاربردی در تثبیت حرارتی خاک‌ها، زیراساس جاده‌ها، تثبیت شیروانی‌ها، اصلاح خصوصیات مهندسی خاک‌های متورم شونده و خاک‌های فروریزشی استفاده می‌شود [۱۳]. روش‌های متعددی به منظور فعال سازی مصالح پوزولانی از جمله روش‌های حرارتی و شیمیایی وجود دارد. در روش‌های حرارتی اعمال حرارت موجب فعال سازی مصالح خام می‌شود و در روش شیمیایی اسید یا باز این نقش را به عهده دارند [۱۴].

حضور کربنات‌ها یکی از فاکتورهای اصلی تغییر بافت در خاک است. حضور کربنات‌ها به شدت ساختار، درصد تخلخل و نفوذپذیری خاک‌های مارنی را تحت تاثیر قرار می‌دهد در حقیقت درصد زیاد کربنات نفوذپذیری خاک را افزایش میدهد [۱، ۱۵]. رایج‌ترین کانی کربناتی یافت شده در خاک‌های مارنی، کلسیت یا کربنات کلسیم ($CaCo_3$) است [۱۱]. نقش کربنات در کنترل بافت و ساختار خاک به مقدار آن بستگی دارد و تاثیر آن بر خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک وابسته به اندرکنش آن در حضور آب است [۱]. سنگ آهکی به صورت معمول در آب خالص محلول نیست اما در حضور CO_2، کربنات یک تعادل شیمیایی را تشکیل می دهد و به آرامی در یک فرم بی‌کربنات که به راحتی در آب انحلال پذیر است حل می‌شود. بنابراین، تشکیلات آهکی در بعضی موارد ساختاری متخلخل و نفوذپذیر دارند [۱۲]. کربنات‌ها به ویژه با تشکیل پیوند بین ذرات خاک و پوشش ذرات خاک می‌توانند تاثیر زیادی بر خصوصیات خاک داشته باشند [۱۱]. وجود حدود ۲۰ تا ۶۵٪ کربنات در خاک های مارنی در منطقه جنوب ایران و تاثیر کربنات بر خصوصیات مهندسی خاک‌ها از جمله چسبندگی، نفوذپذیری و حدود اتربرگ [۱۰]، ضرورت

مطالعه تاثیر تثبیت حرارتی خاک‌های مارنی غنی از کربنات را بر رفتار مهندسی خاک‌های ضروری می‌کند. همچنین حرارت تولیدشده در مراکز دفن زباله‌های سطح بالا (HLW) و تاثیر حرارت ناشی از آن بر مشخصات مهندسی و کارایی خاک یکی از مواردی است که در آن مسئله تأثیر حرارت بر رفتار مهندسی خاک موضوعیت پیدا کرده و اهمیت بسیار دارد [۴]، از سوی دیگر خاک رس یک ماده ترمودینامیکی مناسب است و در مواردی مثل کنترل نشت، جلوگیری از آلودگی، عایق حرارتی و محافظت در برابر تشعشع کاربرد دارد. بنابراین بررسی و پیش بینی خواص مهندسی خاک‌های مارنی هنگامی که در معرض حرارت قرار می‌گیرد، از اهمیت خاصی برخوردار است [۳-۴، ۱۵] . بر این اساس در این مقاله تلاش شده است تا تأثیرحرارت بر خصوصیات مهندسی مارن جنوب از منظر ریزساختاری با نگرش بر بررسی مقاومت فشاری و خصوصیات مهندسی مورد بررسی قرار گیرد.

۲. مواد و روش‌ها

در این پژوهش، در بخش آزمایش‌های رفتاری از خاک مارن غرب شهر بندرعباس در محدوده ایستگاه راه آهن و در حاشیه شمالی خلیج فارس استفاده شده‌است. هدف از این انتخاب بررسی خصوصیات ژئوتکنیکی از منظر ریزساختاری و ارائه راهکار برای فرایند تثبیت خاک مارن منطقه بوده‌است. در این منطقه شیب‌های طبیعی و مصنوعی دچار ناپایداری می‌شوند. همچنین شکست‌های گسترده‌ای در بسیاری از پروژه‌های ژئوتکنیکی از قبیل گسیختگی در فونداسیون‌ها، شیب‌ها و ترک‌های کششی در جاده‌ها گزارش شده‌است. ساختار و کانی‌های تشکیل‌دهنده خاک مارن را می‌توان عامل اصلی بروز چنین مشکلاتی دانست [۱۶]. مشاهدات حاکی از آن است که بیشتر خرابی‌ها پس از بارندگی رخ داده‌است. این نمونه‌ها از نظر زمین‌شناسی متعلق به سازند میشان و سن آن‌ها میوسن زیرین تا میانی است. بر اساس سیستم طبقه‌بندی متحد خاک (USCS)، مارن از نوع خاک رس با خصوصیات خمیری کم (CL) است و ۹۵٪ وزنی آن از الک شماره ۲۰۰ عبور کرده‌است.

بخش اعظم آزمایش‌های انجام‌شده در این تحقیق بر اساس استاندارد ASTM صورت گرفته است [۱۷]. برای تعیین درصد کربنات خاک، از روش تیتراسیون استفاده شده‌است [۱۸]. برای تهیه نمونه‌های اشعه ایکس (XRD) از کلیه نمونه‌ها، یک گرم خاک خشک با دقت ۰/۰۰۱ گرم وزن شده و داخل تیوپ سانتریفیوژ ۵۰ میلی‌لیتر ریخته شد. سپس بعد از اضافه نمودن ۵۰ میلی‌لیتر از الکترولیت مورد نظر (آب مقطر) به خاک، این سوسپانسیون به مدت سه ساعت توسط لرزاننده الکتریکی کاملاً هم زده شد. پس از نگهداری نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت برای اطمینان از حصول شرایط تعادل، این سوسپانسیون مجدداً به مدت سه ساعت توسط لرزاننده الکتریکی کاملاً هم زده شد و نمونه‌ها حدود ۱۲۰ ساعت دیگر نگهداری شد تا سیستم کاملاً همگن شود. سپس نمونه‌ها به مدت ۶۰ دقیقه توسط لرزاننده مجدداً هم زده شدند. در نهایت بین ۵ تا ۷ قطره از این سوسپانسیون بر روی اسلاید شیشه‌ای ریخته شد و پس از خشک شدن، با دستگاه پراش پرتو ایکس مدل (PHILIPS-PW1730) مورد آزمایش قرار گرفتند [۱۹-۲۰].

برای تعیین میزان زاویه اصطکاک داخلی (φ) و میزان چسبندگی (c) نیز آزمایش برش مستقیم بر اساس استاندارد ASTM D 3080-90 انجام شده‌است [۱۷]. ارزیابی پراش پرتو ایکس به‌عنوان یک معیار در تعیین ریزساختار خاک‌ها شناخته شده‌است. منحنی پراش پرتو ایکس خاک مورد مطالعه در شکل (۱) ارائه شده‌است. نتایج آنالیز XRD انجام گرفته بر روی خاک مارن طبیعی نشان می‌دهد که پالی‌گورسکایت، کائولینیت و سپیولایت کانی اصلی رسی و کوارتز، کلسیت و دولومیت کانی‌های غیر رسی موجود در خاک مارن است. در شکل (۱) قله‌های اصلی کانی‌های

رسی، در فاصله (۳/۱۷ Å و ۲/۸۸ Å) مربوط بـه کــــــانی پالی‌گورســــکایت (۱۵/۴ درصد)، فاصله (۷/۰۴ Å) مربوط به کانی کائولینیت (۹/۶ درصد) و فاصله (۱/۸۷ Å) مربـوط به کانی سپیولایت به تفکیک قابل مشاهده اسـت. همـانطور که در شکل (۱) مشاهده می‌شود، با توجه به منحنی پـراش پرتو ایکس (XRD)، قله‌های مربوط به پالی‌گورسکایت کـه کانی اصلی تشکیل‌دهنده خـاک مـارن مـی‌باشـد بـه وفـور مشاهده شده است. حدود ۷۲/۸٪ خاک مارنی از کانی‌هـای غیـر رسـی (۳۶ درصـد کـوارتز و ۳۶/۸٪ کـانی کلسـیت) تشکیل شده‌است.

در جـدول (۱) آنـالیز شـیمیایی (XRF) مـارن مـورد مطالعه ارائه شده است، بر اسـاس آنـالیز ارائـه شـده میـزان اکسید کلسیم موجود در خاک حدود ۱۹/۸۶ درصـد اسـت. در جـدول (۲) برخـی مشخصـات فیزیکـی و ژئـوتکنیکی خاک مارنی مورد مطالعه در این مقاله ارائه‌شده‌است.

برای انجام دیگر آزمایش‌ها، نمونـه‌هـای تهیـه‌شـده از منطقه توسط چکش پلاستیکی خردشده و سپس در معرض حرارت بین ۲۵ تـا ۹۰۰ درجـه سلسـیوس قـرار داده شـده است و تغییرات وزنـی، دانـه بنـدی، وارفتگـی و مقاومـت فشاری محدود نشده‌ی نمونه‌ها بررسی شد.

بر این اساس آزمایش‌های تعیین حدود اتربرگ، دانـه-بنـدی، هیـدرومتری، تغییـرات وزنـی، وارفتگـی، مقاومـت فشاری محدود نشده، آزمایش پراش پرتو ایکس (XRD) و pH بر روی خاک‌ها تحـت تـأثیر حـرارت‌هـای (۲۵، ۱۱۰، ۲۰۰، ۳۰۰، ۴۰۰، ۵۰۰، ۷۰۰ و ۹۰۰ درجـه سلسـیوس) بـر اساس استاندارد ASTM انجام شدند [۱۷]. شایان ذکر است نمونه‌های ساخته شده در حرارت بالا به مـدت ۲۴ سـاعت داخل گرم‌خانه (آون) در دمای ۱۱۰ درجه سلسـیوس قـرار گرفتند. قابل‌ذکر است حرارت کـوره بـا نـرخ ۵ درجـه بـر دقیقه به طور اتوماتیک افزایش یافتـه و پـس از رسـیدن بـه دمای موردنظر به مدت ۲ ساعت در این دما باقی ماندنـد و کوره خاموش شد.

نمونه‌های آزمایش مقاومت فشـاری محـدود نشـده در قالب‌های آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده بـر اسـاس استاندارد ASTM D2166 با رطوبت بهینـه ۱۶٪ و دانسـیته خشک (γ_d =۱/۶۵ (g/cm^3) ساخته‌شده و بـرای رسـیدن بـه حالت تعادل به مدت ۴۸ ساعت در ظـروف پلاسـتیکی بـا رطوبت ثابت نگهداری شدند. سپس بـه مـدت ۲۴ سـاعت داخل گرم‌خانه (آون) در دمای ۱۱۰ درجه سلسـیوس قـرار گرفته و پس از آن به مدت ۲ ساعت تحت تـأثیر حـرارت-هــــای (۱۱۰، ۲۰۰، ۳۰۰، ۴۰۰، ۵۰۰، ۷۰۰ و ۹۰۰ درجـــــه سلسیوس) قرار گرفته است. شایان ذکر است نمونـه مرجـع در دمای ۲۵ درجه سلسیوس نگهداری شده است.

رسانایی الکتریکی و pH خاک به صورت سوسپانسیون (نسبت ۱ خاک به ۱۰ آب مقطر) تهیـه شـده اسـت. سـپس نمونه‌ها به مدت ۷۲ ساعت توسط لرزاننده الکتریکی کاملاً هم زده شد. مقادیر pH با استفاده از دستگاه pH متـر مـدل (Lovi Bond-pH110) اندازه‌گیری شد. همچنـین رسـانایی الکتریکی (EC) کلیه نمونه‌ها توسط دسـتگاه (Lovi Bond) اندازه‌گیری شدند.

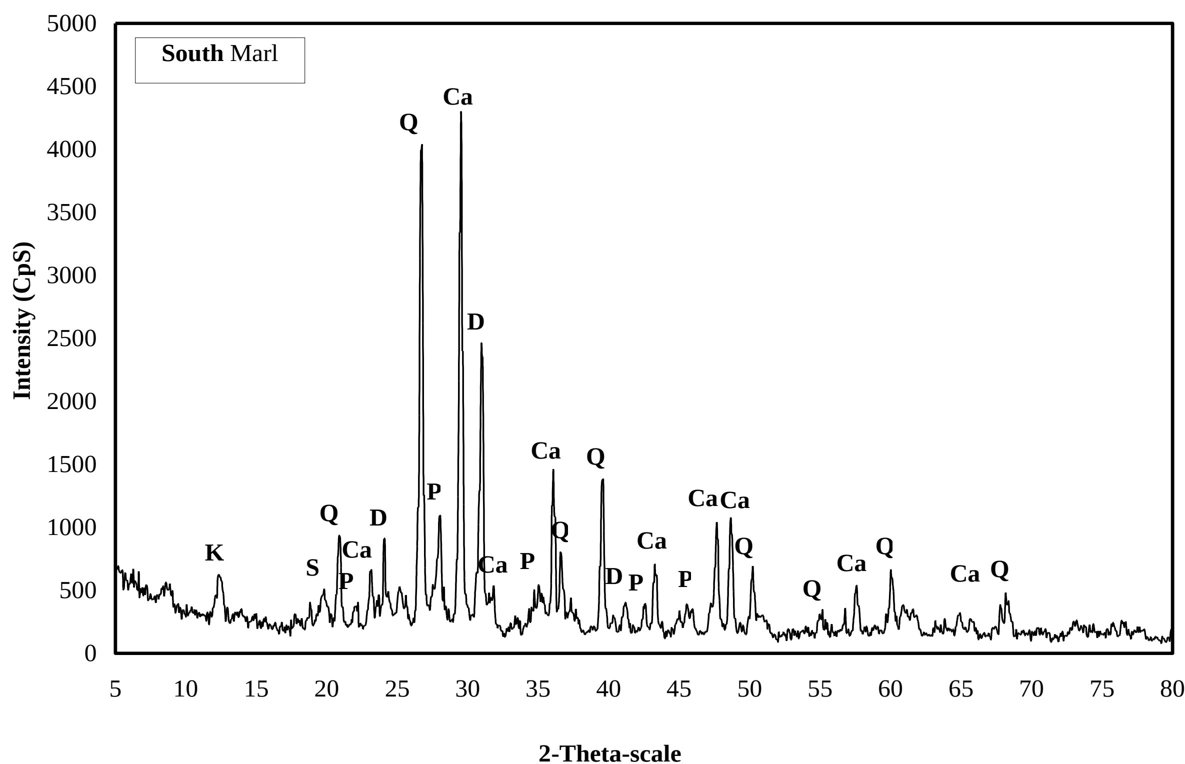
تغییـرات وزن بـرای تمـامی نمونـه‌هـا پـس از اعمـال حرارت اندازه‌گیری و محاسبه شد. همچنین بـرای ارزیـابی تاثیر حرارت بر پایـداری خـاک مـارن، آزمـایش وارفتگـی انجام شد. به همین منظور، نمونه‌هایی مشابه نمونه‌های تک محوری ساخته شدند و در معـرض حـرارت‌هـای مختلـف قرار گرفتند. سپس نمونه‌ها برای انجام آزمایش وارفتگی، به مدت ۲۴ ساعت در حوضچه آب قرار داده شدند، به طوری که نمونه‌ها به طور کامل در آب قرار گرفته شدند.

جدول (۱). مشخصات شیمیایی خاک مارن مورد مطالعه

Parameters / Product type	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	Na2o	MgO	K_2O	TiO2	MnO	P_2O_5	LOI
South Marl	35.555	8.341	5.222	19.863	1.688	6.597	1.605	0.475	0.085	0.124	19.51

جدول (۲). برخی از مشخصات فیزیکی و ژئوتکنیکی نمونه خاک مارن مورد مطالعه

Physical properties of South Marl		*Quantity measured*	*References for method of measurement*
Clay (%)		*34.12*	[17], ASTM, D422-63
pH (1:10; soil: water)		*8.74*	[17], ASTM D4972
Carbonate content (%)		*38.5*	Hesse, 1971
Strength Parameters	C (kg/cm^2)	*0.57*	[17], ASTM D3080-90
	φ^o	*29.5*	[17], ASTM D3080-90
Unconfined Compression Strength (UCS) (kg/cm^2)		*0.7*	[17], ASTM D2166-06
Liquid limit (%)		*28*	[17], ASTM, D4318
Plastic Limit (%)		*18*	[17], ASTM, D4318
Plasticity Index (%)		*10*	[17], ASTM, D4318
Maximum dry density (g/cm3)		*1.65*	[17], ASTM D698
Optimum water content (%)		*16*	[17], ASTM D698
Maximum free –swelling (%)			
permeability coefficient (k) (cm/s)		*1.1e-07*	
G_s		*2.77*	[17] ASTM, D85487
Classification		*CL*	[17], ASTM, D3282
Color			
Soil composition		Palygorskite, Sepiolite, Kaolinite, Calcite, Dolomite, Quartz	ASTM D2216



شکل (۱). منحنی پراش پرتو ایکس خاک مارن جنوب مورد مطالعه

(P: پالیگورسکایت، S: سپیولایت، K: کائولینیت، Ca: کلسیت، Q: کوارتز، D: دولومیت)

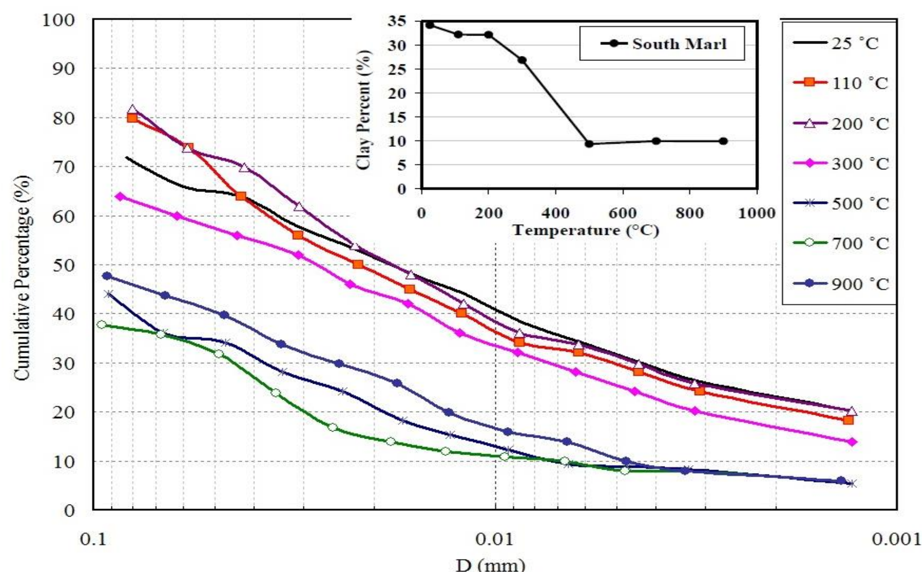
۳- بحث و بررسی

۳-۱- بررسی تغییرات دانه‌بندی وخواص خمیری

حرارت خواص فیزیکوشیمیایی، ساختاری و ترکیب خاک را به طور قابل توجهی تغییر می‌دهد. اعمال حرارت خصوصیات خاک از جمله دانه بندی و در بعضی مواقع رفتار و طبقه‌بندی خاک را تغییر می‌دهد.

منحنی دانه بندی و میزان تغییرات ذرات هم اندازه رس خاک مارن مورد مطالعه در شکل (۲) ارائه شده است. بر اساس نتایج ارائه شده در شکل (۲) با افزایش دما به ۱۱۰ درجه سلسیوس میزان تغییرات منحنی دانه‌بندی چندان قابل توجه نیست. با افزایش دما به ۳۰۰ درجه سلسیوس قطر ذرات کوچکتر از ۰/۰۱ میلی‌متر حدود ۸٪ کاهش یافته است و قطر ذرات کوچکتر ۰/۰۰۲ میلی‌متر حدود ۶٪ کاهش یافته است. با افزایش دما به ۵۰۰ درجه سلسیوس، اندازه ذرات افزایش قابل توجهی داشته است و درصد ذرات هم اندازه رس (۰/۰۰۲ میلی‌متر) از ۳۴٪ به ۹/۴٪ کاهش یافته است. در حقیقت می‌توان بیان کرد آغاز فرآیند دی‌هیدروکسیلاسیون و تخریب ساختار کانی رسی منجر به افزایش اندازه ذرات شده است. در واقع ساختارهای کریستالی کانی‌های رسی موجود در خاک شکسته شده و با پیوندهای شیمیایی شروع به پیوستن به یکدیگر می‌کنند و ذرات بزرگتری را تشکیل می‌دهد که این امر موجب کاهش ۱۵٪ ذرات هم اندازه رس شده است. از سوی دیگر می‌توان بیان کرد که حرارت به علت سیمانتاسیون ذرات در نتیجه شکل‌گیری برخی نمک‌ها و اکسیدهای موجود در خاک موجب ترکیب و چسباندن ذرات به یکدیگر و تغییر ویژگی‌های خاک می‌شوند، این فرآیند نیز می‌تواند بر دانه‌بندی خاک و ویژگی‌های مهندسی خاک تاثیرگذار باشد. با افزایش دما به بیش از ۵۰۰ درجه سلسیوس دانه‌بندی خاک دچار تغییرات محسوسی نشده است، به نحوی که در دمای ۹۰۰ درجه سلسیوس درصد ذرات هم اندازه رس نسبت به دمای ۷۰۰ درجه سلسیوس تغییر خاصی نیافته است.

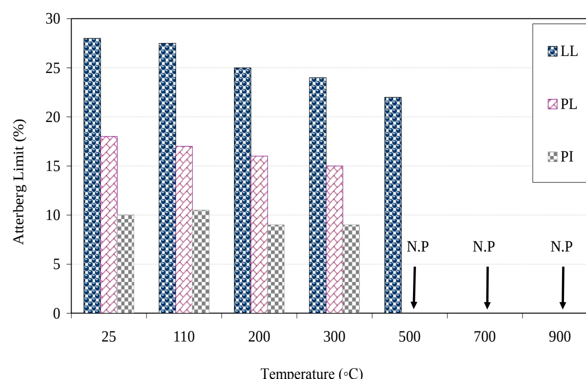
در شکل (۳) تغییرات حدود اتربرگ خاک مارن مورد مطالعه در دماهای مختلف ارائه شده است. حد روانی خاک مارن طبیعی مورد بررسی ۲۸ واحد و حد خمیری آن ۱۸ واحد است. بر اساس نتایج ارائه شده با افزایش دما به ۱۱۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ درجه سلسیوس میزان حد روانی به ترتیب ۰/۵، ۳و ۴ واحد کاهش یافته است که مقادیر قابل توجهی نیست. از سوی دیگر نشانه خمیری با افزایش دما تا ۳۰۰ درجه سلسیوس تنها حدود یک واحد کاهش یافته است.



شکل (۲). منحنی هیدرومتری خاک مارنی اصلاح‌شده با حرارت

با افزایش دما به ۵۰۰ درجه سلسیوس، حد روانی و حد خمیری کاهش قابل توجهی می‌یابد. در حقیقت در دمای ۵۰۰ درجه حد روانی حدود ۷ واحد کاهش یافته و خاک دیگر رفتار خمیری ندارد و رفتار (طبقه‌بندی) خاک از دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس به بالا تغییر کرده و رفتار دانه‌ای به خود می‌گیرد. شایان ذکر است در دمای ۷۰۰ درجه سلسیوس نمونه‌ها به محض مرطوب شدن دچار گیرش می‌شود که به دلیل تشکیل ترکیبات سیمانی در خاک است.

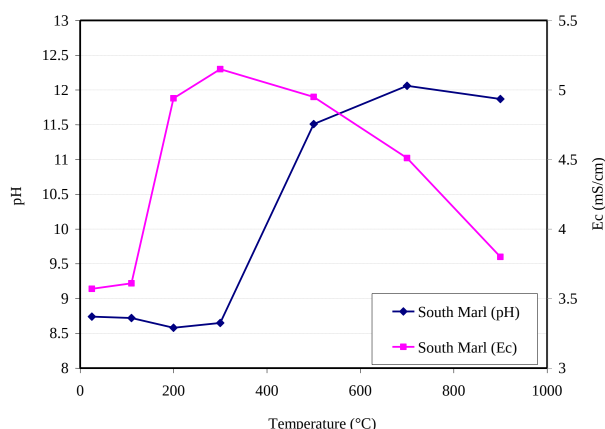
تغییرات حدود اتربرگ خاک‌ها در معرض حرارت، وابسته به نوع کانی رسی و میزان حرارت اعمال شده است. وقوع دی‌هیدروکسیلاسیون سبب تخریب ساختار کانی‌های رسی خاک مارن شده و حدود اتربرگ خاک را تحت تاثیر قرار داده است. مقدار حد خمیری نیز با افزایش دما تا ۳۰۰ درجه که دی‌هیدراسیون اتفاق می‌افتد، کاهش می‌یابد و به مقدار ۱۵ درصد می‌رسد. قابل توجه است که با ادامه روند گرمادهی خاک غیرپلاستیک شده است و انجام آزمایش فیتیله غیرممکن شد، دلیل این تغییر رفتار در نتایج پراش اشعه ایکس مورد بررسی قرار می‌گیرد. این کاهش در حدود اتربرگ، ناشی از تغییر ساختار خاک تحت تاثیر حرارت اعمالی و تغییر رفتار خاک است [۲۱].



شکل (۳). تغییرات حد روانی و حد خمیری خاک مارنی تحت فرآیند تثبیت حرارتی

۳-۲- تغییرات روند pH و EC خاک با افزایش دما

شکل (۴) تاثیر حرارت بر pH خاک را نشان می‌دهد. با افزایش دما تا ۳۰۰ درجه سلسیوس تغییرات قابل توجهی در مقدار pH خاک مشاهده نمی‌شود و به مقدار ناچیزی (حدود ۰/۱) واحد کاهش می‌یابد که با نتایج دیگر محققان همخوانی دارد [۲۲-۲۳]. این کاهش احتمالا به دلیل وقوع برخی واکنش‌های اکسیداسیون است. اما با افزایش دما تا ۵۰۰ درجه سلسیوس pH محیط ۲/۸ واحد افزایش یافته است. روند افزایشی تا دمای ۷۰۰ درجه سلسیوس ادامه می‌یابد و pH محیط به مقدار ۱۲/۰۶ افزایش یافته است، تشکیل ترکیبات سیمانی در دمای ۷۰۰ درجه سلسیوس و واکنش‌های پوزولانی در حضور آب عامل اصلی افزایش pH محیط است. در دمای ۹۰۰ درجه سلسیوس pH به مقدار ناچیزی کاهش یافته و به حدود ۱۱/۸۷ واحد رسیده است.



شکل (۴). تغییرات pH و هدایت الکتریکی (Ec) خاک مارنی تحت فرآیند تثبیت حرارتی

از دیگر دلایل افزایش pH در حرارت‌های بالا، مربوط به آزاد شدن کاتیون‌ها و همچنین کاهش افت گروه‌های OH در زمان دی‌هیدروکسیلاسیون است [۲۲]. از سوی دیگر تجزیه‌ی کربنات (بر اساس نتایج آزمایش تعیین میزان کربنات، خاک مارن موجود حاوی ۳۸٪ کربنات است.) در محدوده دمایی ۵۰۰ تا ۹۰۰ درجه سلسیوس، موجب کاهش اسیدیته‌ی خاک و افزایش pH می‌شود، که در شکل

(۴) مشاهده می‌شود [۲۳]. در واقع در دمای ۷۰۰ و ۹۰۰ درجه سلسیوس محیط مناسب برای انجام واکنش‌های پوزولانی در خاک ایجاد می‌شود.

در شکل (۴) روند تغییرات هدایت الکتریکی خاک مارن تحت حرارت‌های مختلف نیز ارائه شده است. کاهش میزان هدایت الکتریکی با افزایش دما، می‌تواند به تخریب کانی‌های رسی، تشکیل اکسیدها و تشکیل ذرات درشت نسبت داده شود [۲۲]. با افزایش دما به ۱۱۰ درجه سلسیوس، میزان هدایت الکتریکی تغییرقابل توجهی نداشته است. از سوی دیگر با افزایش دما به ۲۰۰ درجه سلسیوس هدایت الکتریکی حدود (mS/cm) ۱/۳۷ افزایش و به مقدار (mS/cm) ۴/۹۵ رسیده است. با افزایش دما به ۳۰۰ و ۵۰۰ درجه سلسیوس میزان هدایت الکتریکی به میزان بیشینه خود رسید و حدود (mS/cm) ۵ می‌شود. با افزایش دما به ۷۰۰ و ۹۰۰ درجه سلسیوس هدایت الکتریکی خاک کاهش یافته و در نهایت به مقدار (mS/cm) ۳/۸ رسیده است. تشکیل ساختار شیشه‌ای در دماهای زیاد از علل کاهش هدایت الکتریکی در دماهای بالا است.

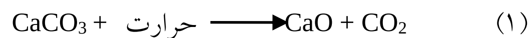
۳-۳- آنالیز ریزساختاری خاک مارن تحت تاثیر حرارت با استفاده از آنالیز XRD

جهت تعیین ترکیب کانی‌شناسی خاک مارن مورد مطالعه و همچنین به منظور بررسی تغییرات ریزساختاری نمونه‌های مارن تحت حرارت‌های مختلف، آزمایش پراش پرتو ایکس (XRD) انجام شده است. منحنی پراش پرتو ایکس خاک مارنی تحت اعمال حرارت‌های مختلف در شکل (۵) ارائه شده است.

بر اساس نتایج ارائه شده در شکل (۵) شدت قله اصلی کانی پالی‌گورسکایت (۳/۱۷ Å) با افزایش حرارت به ۱۱۰ درجه سلسیوس تغییر محسوسی نداشته است و حدود ۷۳ CpS کاهش یافته است که دلیل آن می‌تواند حذف آب فیزیکی خاک باشد. با افزایش دما تا۵۰۰ درجه سلسیوس قله اصلی کانی پالی‌گورسکایت تغییر محسوسی نداشته است. با افزایش دما به ۷۰۰ درجه سلسیوس شدت قله اصلی کانی پالی‌گورسکایت با افت مواجه شده است، به نحوی که قله این کانی از ۱۰۸۲ CpS به ۶۷۰ CpS کاهش یافته است و کاهش ۳۷٪ را تجربه می‌کند. در واقع افزایش دما موجب از دست رفتن آب بین لایه‌ها می‌شود که این فرایند باعث کاهش در شدت قله کانی‌های رسی می‌شود [۲۳-۲۴]. با افزایش دما به ۹۰۰ درجه قله اصلی کانی پالی-گورسکایت به ۳۰۱ CpS کاهش یافته است. این روند برای قله‌های دیگر کانی پالی‌گورسکایت نیز وجود دارد، به نحوی که در فاصله ۷/۰۹ Å نیز قله کانی پالی‌گورسکایت از۶۰۸ CpS به ۲۳۰ CpS کاهش یافته است. در حقیقت می‌توان بیان نمود که کانی پالی‌گورسکایت تا دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس پایدار است و پس از آن پایداری خود را از دست می‌دهد. بر این اساس می‌توان بیان نمود که فرآیند دی‌هیدروکسیلاسیون در دمای بیش از ۵۰۰ درجه سلسیوس آغاز می‌شود و منجر به تخریب کانی‌های رسی مارن می‌شود. شایان ذکر است در دمای ۷۰۰ و ۹۰۰ درجه سلسیوس قله‌های جدیدی در پراش اشعه ایکس نمونه‌های مورد مطالعه مشاهده می‌شود که در ادامه مورد بررسی قرار می‌گیرد.

قله اصلی کلسیت در فاصله ۳/۰۳ Å مشاهده می‌شود، بر اساس نتایج ارائه شده در شکل (۵) تغییرات شدت قله اصلی کلسیت در دمای ۱۱۰، ۲۰۰، ۳۰۰ و ۵۰۰ درجه سلسیوس تغییرات محسوسی نداشته است به نحوی که میزان تغییرات قله اصلی در دماهای ۲۵ تا ۵۰۰ درجه سلسیوس بین ۵٪ تا ۸٪ است. با افزایش دما به ۷۰۰ درجه سلسیوس شدت قله کلسیت با کاهش ۸۲۰ CpS مواجه شده است. این روند کاهش تا دمای ۹۰۰ درجه ادامه یافته و در این دما قله کلسیت به طور کامل حذف شده است و کانی کلسیت به صورت کامل از بین رفته است. بر اساس مطالعات دیگر پژوهشگران کربنات کلسیم در دمای ۸۰۰ تا

۸۷۰ درجه سلسیوس به صورت کامل تجزیه می‌شود [۲۵]. در واقع کربنات کلسیم در اثر حرارت تجزیه می شود و در نتیجه آن مطابق با واکنش رابطه (۱) دی اکسید کربن آزاد شده و به اکسید کلسیم یا آهک زنده تبدیل می شود [۲۵].



بر این اساس اکسید کلسیم آزاد شده در دمای ۷۰۰ و ۹۰۰ درجه سلسیوس در صورتی که در معرض آب قرار گیرند، با آب واکنش داده و بر طبق رابطه (۲) هیدروکسید کلسیم یا آهک شکفته را تشکیل می‌دهد.

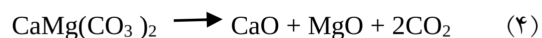


هیدروکسید کلسیم حاصل از واکنش رابطه (۲) با وجود مصالح سیلیسی و آلومینوسیلیس‌ها و رطوبت مناسب با انجام واکنش‌های پوزولانی می‌تواند موجب تشکیل نانوساختار هیدرات سیلیکات کلسیم (C-S-H) و هیدرات آلومینات کلسیم (C-A-H) شود [۲۶–۲۷].

در حقیقت در خاک مارن حاوی درصد کربنات بالا (۳۸/۵ ٪)، هنگامی که در معرض حرارت‌های بیش از ۵۰۰ درجه سلسیوس قرار می‌گیرد، پس از تجزیه کربنات کلسیم، اکسید کلسیم با فازهای حاصل از تخریب فیلوسیلیکات‌های موجود واکنش داده و بر طبق رابطه (۳) تشکیل سیلیکات‌های کربناتی از جمله ژلنیت می‌دهد.



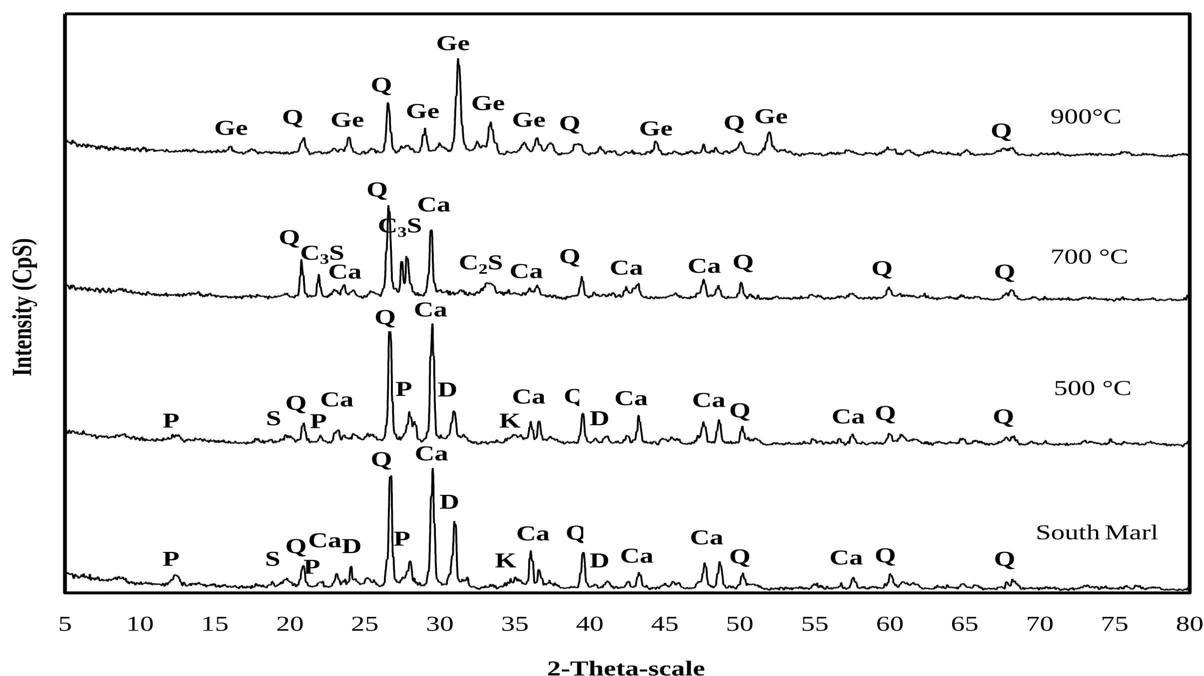
همچنین دولومیت در اثر حرارت کمتری نسبت به کلسیت و در حدود ۷۰۰ درجه تجزیه شده و مطابق با واکنش رابطه (۴) با آزاد شدن دی اکسید کربن به اکسید منیزیم و اکسید کلسیم تبدیل می شود [۲۵].



بر اساس بررسی منحنی پراش اشعه ایکس شکل (۵) در دمای ۹۰۰ درجه سلسیوس قله‌های ترکیبات ژلنیت در فواصل ۲/۸۵ Å و ۱/۷۵ Å مشاهده می‌شود. با افزایش دما تا ۷۰۰ درجه سلسیوس، شدت قله‌های کلسیت، کاهش می‌یابد و در دمای ۹۰۰ درجه به طور کامل حذف شده‌اند و قله‌های جدیدی که مربوط به کانی ژلنیت است، تشکیل شده‌اند. ژلنیت جز آلومینوسیلیکات‌های کلسیم طبقه‌بندی می‌شود که بر اثر واکنش اکسید کلسیم حاصل از تجزیه کلسیت با فازهای آمورف موجود از جمله سیلیس و آلومین تشکیل می‌گردد [۲۵]. در حقیقت زمانی که دما به ۸۰۰ درجه سلسیوس می‌رسد کلسیم کربنات به کلسیم اکسید تجزیه می‌شود و ژلنیت نیمه پایدار ظاهر می‌شود. همچنانکه دما افزایش می‌یابد مقدار ژلنیت کاهش می‌یابد. فازهای ایجاد شده در تشکیل فاز شیشه‌ای نقش دارند [۲۷]. علت حضور ژلنیت را می‌توان به نسبت بالای کلسیت به سایر کانی‌ها مرتبط دانست [۲۸].

بر اساس نتایج آنالیز پراش اشعه ایکس در دمای ۷۰۰ درجه سلسیوس قله‌های ضعیف در فواصل ۳/۲ Å و ۳/۲۵ Å و ۲/۶۹ Å مشاهده می‌شود که مربوط به ترکیبات سیمانی آلیت (C_3S) و بلیت (C_2S) است. تشکیل این ترکیبات می‌تواند عامل اصلی گیرش نمونه مورد مطالعه در دمای ۷۰۰ درجه سلسیوس باشد که موجب می‌شود که امکان انجام آزمایش حدود اتربرگ در این دما نباشد.

همچنین کانی دولومیت در اثر حرارت کمتری نسبت به کلسیت و در دمای ۷۰۰ درجه تجزیه می‌شود. قله‌های دولومیت نیز در دمای ۷۰۰ درجه به طور کامل حذف شده‌اند. با افزایش دما تا ۹۰۰ درجه سلسیوس، شدت پیک‌های کوارتز کاهش می‌یابد اما حذف نمی‌شود.



شکل (۵). منحنی پراش اشعه ایکس خاک مارنی تحت فرآیند تثبیت حرارتی

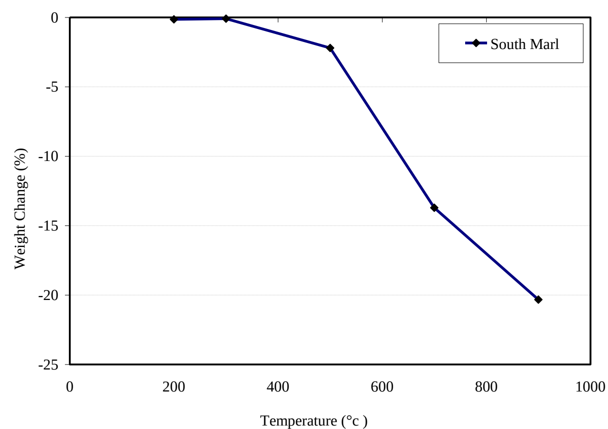
(P: پالیگورسکایت، S: سپیولایت، K: کائولینیت، Ca: کلسیت، Q: کوارتز، D: دولومیت، Ge: ژلنیت، C_3S: آلیت، C_2S: بلیت)

۳-۴- تغییرات وزنی و دمای دی‌هیدروکسیلاسیون

دی‌هیدروکسیلاسیون به خروج یون هیدروکسیل از ساختار کانی‌های رسی خاک به شکل آب اطلاق می‌شود که به تبع آن، وزن نمونه خاک به شکل ناگهانی کاهش می‌یابد. بنابراین افت ناگهانی وزن، معیار مناسبی برای تشخیص دمای دی‌هیدروکسیلاسیون کانی‌های رسی است. بر اساس نتایج آنالیز پراش اشعه ایکس (XRD)، پیش‌بینی شد که دمای دی‌هیدروکسیلاسیون در دمای بیش از ۵۰۰ درجه سلسیوس در خاک مارن حادث می‌شود. بر این اساس در این بخش تغییرات وزنی نمونه‌های مارن مورد مطالعه در دماهای مختلف ارائه شده است. شایان ذکر است برای بررسی تغییرات وزنی نمونه‌های استوانه‌ای به ابعاد (قطر ۴/۴ و ارتفاع ۸/۸ سانتی‌متر) ساخته و بعد از قرار گرفتن در حمام رطوبت به مدت ۳ روز ابتدا در دمای ۱۱۰ درجه سلسیوس قرار گرفته و سپس در دماهای ۲۰۰، ۳۰۰، ۵۰۰، ۷۰۰ و ۹۰۰ درجه سلسیوس قرار گرفته است. بر اساس نتایج ارائه شده در شکل (۶) در دمای ۲۰۰ و ۳۰۰ درجه سلسیوس میزان افت وزنی قابل توجه نیست. با افزایش دما به ۵۰۰ درجه سلسیوس میزان افت وزنی نمونه‌ها به حدود ۲/۲٪ رسیده است. با افزایش دما تا ۷۰۰ درجه سلسیوس، وزن نمونه‌های مارن به صورت ناگهانی به میزان ۱۴٪ کاهش می‌یابد. این افت وزن چشمگیر به علت شروع فرآیند دی‌هیدروکسیلاسیون در مارن و تخریب ساختار کانی‌های رسی مارن است. بنابراین می‌توان بیان نمود دمای بین ۵۰۰ تا ۷۰۰ درجه سلسیوس، دمای شروع دی‌هیدروکسیلاسیون کانی‌های رسی خاک مارنی است، که این نتایج صحت تحلیل‌های صورت گرفته در نتایج آزمایش پراش اشعه ایکس را تأیید می‌کند. دی‌هیدروکسیله شدن پالی‌گورسکایت که کانی رسی اصلی خاک مارنی است و تخریب آن در دمایی بیش از ۵۰۰ درجه شروع می‌شود، این روند برای کانی رسی کائولینیت هم مشاهده می‌شود. روند تغییرات ریزساختاری مارن، تحت حرارت با آنالیز پراش پرتو ایکس (XRD) که در شکل (۵) ارائه شده

است، صحت این مطلب را نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که روند افزایش افت وزن تا دمای ۹۰۰ درجه سلسیوس نیز ادامه پیدا می‌کند و به میزان ۲۰/۵٪ می‌رسد.

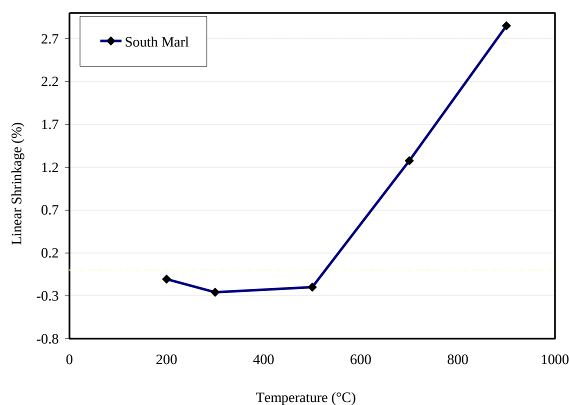
در واقع علت افت وزن در دو بخش رسی و بخش کربناتی خاک مارن است. در حقیقت میزان افت وزنی ۱۴٪ تا دمای ۷۰۰ درجه سلسیوس را می‌توان به دلیل دی-هیدروکسیلاسیون کانی‌های رسی موجود در خاک مارنی مرتبط دانست و افت وزنی ۶/۵ درصدی از دمای ۷۰۰ تا ۹۰۰ درجه را به تجزیه کربنات و آزادسازی دی اکسید کربن ارتباط دارد.



شکل(۶). تغییرات وزنی نمونه‌های مارن تحت فرآیند تثبیت حرارتی

۳-۵- تغییرات انقباض خطی نمونه‌ها

به منظور بررسی تاثیر حرارت بر خصوصیات فیزیکی نمونه‌های مارن، انقباض خطی نمونه‌ها تحت حرارت‌های ۲۰۰، ۳۰۰، ۵۰۰، ۷۰۰ و ۹۰۰ درجه سلسیوس تعیین شده است. انقباض خطی از تغییرات طول ارزیابی می‌شود. مقادیر انقباض خطی با استفاده از کولیس دیجیتال بعد از مراحل خشک شدن و حرارت دهی در کوره، اندازه گیری می‌شود [۲۹]. همان‌طور که در شکل (۷) مشاهده می‌شود، انقباض نمونه‌ها در دمای ۲۰۰ درجه سلسیوس، ۰/۱٪ است، که با اعمال حرارت تا دمای ۳۰۰ درجه سلسیوس، انقباض افزایش می‌یابد و به مقدار ۰/۳٪ می‌رسد. این امر درنتیجه دی‌هیدراسیون اتفاق می‌افتد، در واقع به دلیل خروج آب حفره‌ای، جذبی و بین لایه‌ای نمونه با کاهش حجم و ابعاد مواجه است. شایان ذکر است مقدار و میزان انقباض در طی خشک شدن بستگی به پراکندگی اندازه ذرات، مقدار آبی که برای ایجاد حالت خمیری استفاده می-شود، ترکیب، حضور و یا عدم حضور ناخالصی‌ها و مقدار آب تشکیل دهنده ساختار دارد [۳۰]. با افزایش حرارت تا دمای ۵۰۰ درجه، انقباض خطی نمونه‌ها کاهش می‌یابد. اما در دمای ۷۰۰ و ۹۰۰ درجه سلسیوس به ترتیب، ۱/۲۷٪ و ۲/۸٪ انبساط و افزایش تخلخل مشاهده می‌شود. علت انبساط نمونه‌ها را می‌توان به مقدار زیاد کربنات کلسیم و تجزیه کربنات و آزادسازی دی اکسید کربن در دماهای زیاد دانست، از سوی دیگر بر اساس مطالعات دیگر پژوهشگران کلسیت و دولومیت موجود در خاک‌های مارنی، جمع شدگی ناشی از گرمایش را کاهش می‌دهند [۳۱]، به طور کلی کربنات‌ها منجر به کاهش انقباض می-شوند [۳۲-۳۳].



شکل (۷). تغییرات انقباض خطی نمونه‌های مارن تحت فرآیند تثبیت حرارتی

۳-۶- بررسی مقاومت فشاری خاک مارنی تحت فرآیند تثبیت حرارتی

برای بررسی مقاومت فشاری خاک مارن تحت تاثیر حرارت، آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده نمونه‌های مارن در حرارت‌های ۲۵، ۱۱۰، ۲۰۰، ۳۰۰، ۵۰۰، ۷۰۰ و

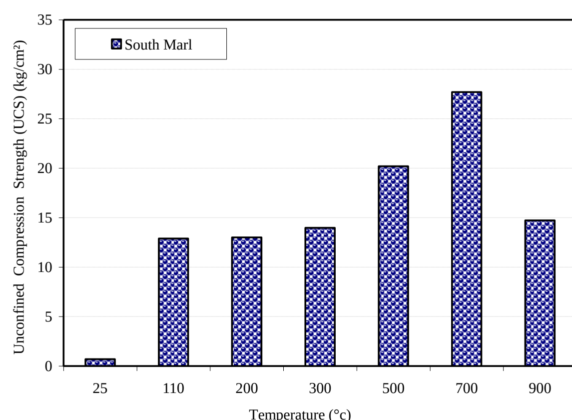
۹۰۰ درجه سلسیوس انجام شد. در شکل (۸) منحنی تاثیر حرارت بر مقاومت فشاری محدود نشده خاک مارن جنوب در حرارت‌های مختلف نشان داده شده است. بر اساس نتایج حاصل شده مقاومت خاک مارن طبیعی ۰/۷ کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع است. بر اساس نتایج ارائه شده در شکل (۸)، مقاومت فشاری محدود نشده مارن در دمای ۱۱۰ درجه سلسیوس، ۱۲/۸۹ کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع است که این مقدار ۱۸ برابر مقاومت مارن طبیعی است. دلیل این افزایش مقاومت می‌تواند از دست دادن رطوبت نمونه باشد. روند افزایش مقاومت از ۱۱۰ درجه تا دمای ۳۰۰ درجه سلسیوس به کندی رخ می‌دهد و میزان مقاومت در دمای ۳۰۰ درجه سلسیوس به حدود ۱۳/۹۷ کیلوگرم بر سانتی-مترمربع افزایش یافته است. در واقع در این مرحله به دلیل فرایند دی‌هیدراسیون با گرم شدن خاک، مقدار آب بین لایه‌ای کاهش می‌یابد. همچنین کاهش دافعه الکتریکی بین ذرات رس باعث افزایش مقاومت فشاری خاک می‌شود [۳۴].

در دمای ۷۰۰ درجه سلسیوس میزان مقاومت فشاری به حدود ۲۷/۶۹ کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع رسیده است که افزایش ۳۹/۵ برابر نسبت به خاک مارن طبیعی را نشان می-دهد. با توجه به وقوع دی‌هیدروکسیلاسیون در دمای بیش از ۵۰۰ درجه سلسیوس، این افزایش مقاومت را می‌توان به فرایند دی‌هیدروکسیلاسیون نسبت داد. به عبارتی، آرایش اتمی حاصل شده از دی‌هیدروکسیلاسیون منجر به افزایش مقاومت نمونه‌ها شده است [۳۵]. علت این امر وقوع پدیده دی‌هیدروکسیلاسیون در این محدوده دمایی، تغییر ساختار خاک و تشکیل ترکیبات سیمانی است. ارزیابی نتایج پراش اشعه ایکس (شکل۵) در دمای ۷۰۰ درجه سلسیوس نیز کاهش میزان کانی‌های رسی و تشکیل ترکیبات جدید را نشان می‌داد. بر اساس نتایج پراش اشعه ایکس در دمای ۷۰۰ درجــه قله اصــلی کانی پـالی‌گورسکایت حدود ۴۰۰ CpS کاهش یافت و ترکیبات جدید سیمانی نیز تشکیل شده است که می‌تواند یکی از عوامل اصلی افزایش مقاومت باشد. در حقیقت کانی‌های رسی خاک مارنی دی-هیدروکسیله می‌شوند، ساختار چین خورده ذرات و پولک-های رسی، جای خود را به ذرات چسبیده به یکدیگر و همگن می‌دهند و در نتیجه ساختار همگن، مقاومت را افزایش داده است.

با افزایش دما تا ۹۰۰ درجه سلسیوس، مقاومت فشاری به مقدار ۱۴/۷۳ کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع می‌رسد، در این دما میزان مقاومت فشاری حدود ۴۶/۸٪ کاهش یافته است. در واقع می‌توان بیان نمود که به دلیل اینکه کربنات کلسیم در اثر حرارت در دمایی حدود ۸۳۰ تا ۸۷۰ درجه تجزیه می‌شود و در نتیجه دی اکسید کربن آزاد شده و به اکسید کلسیم یا آهک زنده تبدیل می‌شود [۲۵]، بنابراین می‌توان بیان نمود افت مقاومت به علت تغییر ساختار خاک در دمایی بیشتر از دمای دی‌هیدروکسیلاسیون و افزایش تخلخل مارن است. خاک مارنی مورد مطالعه دارای ۳۸/۵٪ کربنات است، از طرفی کربنات کلسیم در محدوده حرارتی ۸۳۰ تا ۸۷۰ درجه سلسیوس تجزیه شده و گاز دی اکسید کربن تولید می‌کند که ساختار خاک را متخلخل می‌کند و در نتیجه مقاومت خاک را کاهش می‌دهد. هر چه کربنات مارن بیشتر باشد، در اثر تجزیه حرارتی، تولید گاز دی اکسید کربن بیشتر شده و مقاومت بیشتر کاهش می‌یابد. بر اساس نتایج آزمایش پراش اشعه ایکس (شکل۵) در دمای ۹۰۰ درجه سلسیوس ترکیبات جدید ژلنیت در فواصل فواصل Å ۲/۸۵ و Å ۱/۷۵ تشکیل می‌شود. ژلنیت دارای ساختاری شیشه‌ای و متخلخل است که موجب کاهش مقاومت فشاری نمونه‌ها در این دما می‌شود. بر این اساس می‌توان بیان نمود که ضعف خصوصیات مقاومتی ترکیب ژلنیت تشکیل شده، مقاومت خاک مارنی را کاهش می‌دهد. با این وجود شایان ذکر است که مقاومت نمونه در دمای ۹۰۰ درجه سلسیوس، نسبت به نمونه طبیعی حدود ۲۱ برابر شده است. بر اساس نتایج تغییرات انقباض خطی در

دمای ۹۰۰ درجه سلسیوس به دلیل تجزیه حرارتی و تولید گاز دی اکسید کربن نمونه‌ها دچار ترک، افزایش تخلخل و انبساط حجمی می‌شوند که باعث کاهش مقاومت می‌شود.

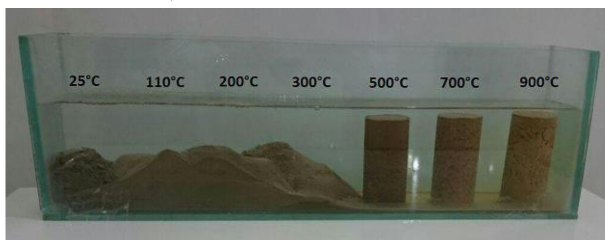
به طور کلی می‌توان بیان کرد که رس‌های حاوی درصد کربنات بالا (خاک مارن) به ویژه خاک‌هایی که دارای کلسیت هستند، تاثیر مثبت بر مقاومت مکانیکی دارند، زیرا کربنات‌ها عامل تشکیل منافذ هستند و فازهای بلورین در طول پخت ایجاد می‌کنند که مقاومت مکانیکی را افزایش می‌دهد [۳۶]. از سوی دیگر ترکیب ژلنیت به دلیل ضعف خصوصیات مقاومتی، باعث کاهش مقاومت خاک در دمای ۹۰۰ درجه سلسیوس می‌شود. شایان ذکر است با استفاده از چارچوب عمومی مکانیک حالت بحرانی، می‌توان مدل رفتاری حرارتی برای پیش بینی رفتار هم دمای مارن‌ها در دماهای مختلف را ارائه نمودند [۳۷].



شکل(۸). تغییرات مقاومت فشاری محدود نشده خاک مارن جنوب تحت فرآیند تثبیت حرارتی

۳-۷. وارفتگی و جذب آب

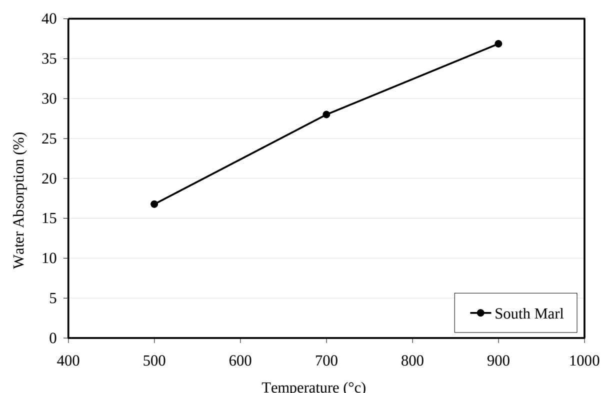
از مشکلات اصلی خاک‌های مارنی عدم دوام، وارفتگی و جذب آب در معرض رطوبت است بر این اساس در این بخش به بررسی تاثیر حرارت بر پایداری نمونه‌های خاک مارن که تحت حرارت تثبیت شده‌اند، پرداخته شده است. بر این اساس نمونه‌ها بعد از گرمایش، توزین شده و بعد به مدت ۲۴ ساعت غرقاب شدند. همانطور که در شکل (۹) مشاهده می‌شود نمونه‌های با تاریخچه حرارتی کمتر از ۵۰۰ درجه سلسیوس، بلافاصله پس از غرقاب شدن به طور کامل متلاشی شدند و تنها نمونه‌های که در معرض دمای ۵۰۰، ۷۰۰ و ۹۰۰ درجه سلسیوس قرار داشته‌اند بدون تغییر باقی ماندند. بر اساس نتایج آزمایش پراش اشعه ایکس (شکل ۵) تا دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس کانی پالی-گورسکایت که به عنوان یکی از عوامل وارفتگی در خاک-های مارنی است، پایدار است و عامل اصلی وارفتگی است. بر این اساس در حالی که با وجود افزایش نسبی مقاومت نمونه‌های در معرض دمای کمتر از ۵۰۰ درجه مشاهده می‌شود، این مقاومت همیشگی نبوده و در اثر غرقاب شدن از بین می‌روند و فقط نمونه‌هایی که در معرض دمای دی-هیدروکسیلاسیون و بالاتر قرار داشته‌اند (تخریب کانی‌های رسی پالی‌گورسکایت)، به دلیل تخریب ساختار رس و در نتیجه پیوند ذرات، در برابر غرقاب شدن مقاوم هستند [۴].



شکل(۹). تصویر نمونه‌های خاک مارن تثبیت حرارتی شده، پس از ۲۴ ساعت غرقاب شدن

با توجه به وارفتگی نمونه‌های تثبیت شده با حرارت کمتر از ۵۰۰ درجه سلسیوس، انجام آزمایش جذب آب تنها برای نمونه‌های با تاریخچه حرارتی ۵۰۰، ۷۰۰ و ۹۰۰ درجه سلسیوس امکان پذیر است. همان طور که در شکل (۱۰) مشاهده می‌شود با افزایش دما، میزان جذب آب افزایش یافته است. مقدار جذب آب نمونه‌ها در دمای ۹۰۰ درجه سلسیوس، ۳۶/۸٪ است که دو برابر جذب آب در دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس است. در حقیقت تجزیه کربنات، باعث افزایش تخلخل می‌شود. بر این اساس در صورت افزایش درصد کربنات پیش‌بینی می‌شود میزان جذب آب نیز افزایش یابد. می‌توان استدلال کرد که در این محدوده حرارتی به تدریج کربنات تجزیه شده و گاز دی-

اکسید کربن آزاد شده است و در نتیجه تخلخل نمونه‌ها و در پی آن جذب آب افزایش یافته است. همچنین می‌توان استدلال کرد که با تجزیه کربنات، اکسید کلسیم حاصل می‌شود که با قرارگیری نمونه‌ها در آب، هیدراته می‌شود و به این ترتیب، میزان جذب آب را بالا می‌برد [۳].



شکل (۱۰). تغییرات جذب آب نمونه‌های خاک مارنی تحت فرآیند تثبیت حرارتی

۴. نتیجه‌گیری

بر اساس مطالعات آزمایشگاهی انجام‌شده در این پـژوهش، نتایج ذیل قابل‌استخراج است:

۱. تغییرات ایجاد شده در خصوصیات خاک‌ها هم از لحاظ ریزساختار و هم درشت ساختار تابعی از حرارت اعمالی، نوع کانی رسی و اجزا تشکیل‌دهنده خاک به ویژه درصد کربنات موجود است.

۲. حرارت به علت فرآیند دی‌هیدروکسیلاسیون و تخریب ساختار کانی رسی و همچنین سیمانتاسیون ذرات خاک موجب ترکیب و چسباندن ذرات به یکدیگر و کاهش ۱۵٪ ذرات هم اندازه رس شده است.

۳. در دمای ۵۰۰ درجه حد روانی حـدود ۷ واحـد کـاهش یافته و خاک دیگر رفتار خمیـری نـدارد و خـاک از دمـای ۵۰۰ درجه سلسیوس به بالا رفتار دانه‌ای به خود مـی‌گیـرد. در دماهای ۷۰۰ و ۹۰۰ درجه سلسیوس خاک به طور کامل پلاستیسـیته خـود را از دسـت مـی‌دهـد. وقـوع دی-هیدروکسیلاسیون و تخریب ساختار کانی‌های رسـی عامـل اصلی این روند است.

۴. تشکیل ترکیبات سیمانی در دمای ۷۰۰ درجه سلسیوس و واکنش‌های پوزولانی در حضور آب عامل اصلی افزایش pH محیط در دمای ۷۰۰ درجه سلسیوس (pH=۱۲/۰۶) است، از دیگر دلایل افزایش pH در حرارت‌های بالا، مربوط به آزاد شدن کاتیون‌ها و تجزیه‌ی کربنات در محدوده دمایی ۵۰۰ تا ۹۰۰ درجه سلسیوس است.

۵. کانی پالی‌گورسکایت تا دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس پایدار است و پس از آن پایداری خود را از دست می‌دهد.

۶. با افزایش دما تا ۷۰۰ و ۹۰۰ درجه سلسیوس، وزن نمونه‌های مارنی به ترتیب به ۱۴٪ و ۲۰/۵٪ کاهش می‌یابد. علت افت وزن در دو بخش رسی و بخش کربناتی خاک مارن است. در حقیقت میزان افت وزنی ۱۴٪ تا دمای ۷۰۰ درجه سلسیوس را می‌توان به دلیل دی‌هیدروکسیلاسیون کانی‌های رسی و تخریب ساختار کانی‌های رسی مارن و افت وزنی ۶/۵ درصدی از دمای ۷۰۰ تا ۹۰۰ درجه را به تجزیه کربنات و آزادسازی دی اکسید کربن ارتباط دارد

۷. در دمای ۷۰۰ درجه سلسیوس میزان مقاومت فشاری به حدود ۲۷/۶۹ کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع رسیده است. وقوع دی‌هیدروکسیلاسیون در دمای بیش از ۵۰۰ درجه سلسیوس و تغییر آرایش اتمی حاصل شده از دی-هیدروکسیلاسیون منجر به افزایش مقاومت نمونه‌ها شده است.

۸. در دمای ۹۰۰ درجه سلسیوس تشکیل ژلنیت با ساختاری شیشه‌ای و متخلخل موجب کاهش مقاومت فشاری نمونه‌ها در این دما شده است.

۹. در تثبیت حرارتی خاک‌های رسی، حرارت اعمالی مـی-بایست بیش از دمای دی‌هیدروکسیلاسیون خـاک باشـد تـا مقاومت حاصله در برابـر خـیس شـدگی حفـظ شـود. بـه طوری که بر اساس نتایج به دست آمده تنها نمونـه‌هـایی از

مارن پس از غرقاب شدن پایدار ماندند که در دمـایی برابـر با ۵۰۰ درجه سلسیوس و بیش از آن قرار گرفته‌اند.

۵. قدردانی

مؤلفین این مقاله بر خود لازم می‌دانند از حوزه معاونت پژوهشی دانشگاه هرمزگـان بـرای تهیـه بخشـی از مـواد و وسایل این تحقیق تشکر نمایند.

۶. مراجع

1. Lamas, F., Irigaray, C., Chacón, J., (2002). Geotechnical characterization of carbonate marls for construction of impermeable dam cores. Eng. Geol. 66, 283–294.
2. Ouhadi, V.R., Yong, R.N., (2003). The role of clay fractions of marly soils on their post stabilization failure. 70, 365–375.
3. Ouhadi, V.R., (1997). The role of marl components and ettringite on the stability of stabilized marl. PhD thesis, Department of Civil Engineering and applied mechanics, McGill University, Montreal, Canada.
4. Ouhadi, V., PourZafarani, M. (2014). 'Influence of Temperature on Unconfined Compressive Strength and Water Absorption of Sand-Bentonite Mixture in the Presence of Carbonate', *Modares Civil Engineering journal*, 14(1), pp. 147-157.
5. Oostwoud Wijdenes, D.J., and Ergenzinger, P., (1998). Erosion and sediment transport on steep marly hillslopes, Draix, Haute-Provence, France: an experimental field study. J. Catena, 33: 179-200.
6. Lamas, F., Irigaray, C., Oteo, C., and Chacón, J., (2005). Selection of the most appropriate method to determine the carbonate content for engineering purposes with particular regard to marls. J. Engineering Geology, 81; 32-41.
7. KerstinElert, J., Miguel, A., Fernando, N., (2018). “Smectite formation upon lime stabilization of expansive marls”, Applied Clay Science, pp. 29-36.
8. Jefferson, I., (1994). "Temperature effects on clay soils" Loughborough University.
9. Wang, M., Benway, J. M., Arayssi, A. M., (1990) "The effect of heating on engineering properties of clays", ASTM Special Technical Publication, pp. 139-158.
10. Brindley, G., (1975). Thermal transformations of clays and layer silicates. Proceedings of the International Clay Conference, Mexico City. Applied Publishing, Wilmette, Illinois, pp. 119-129.
11. Morris, P. H. & Wong, L., (2005). Modification of Dredged Sediments to Produce Useful Product by Heating to High Temperatures, Sustainable Tourism CRC.
12. Wang, M., Benway, J. M., and Arayssi, A. M., (1990) "The effect of heating on engineering properties of clays", ASTM Special Technical Publication, pp. 139-158.
13. Chandrasekhran EC., Boominathan S., Sadayan E., Narayanaswami KR., (1995) Influence of heat treatment on the pulverization and stabilization characteristics of typical tropical soils. Special Report No, Highway Research Board, Washington, DC, ASCE; 121(10): pp. 1497-1506.
14. Vizcayno, C.,De Gutiérrez, R. M.,Castello, R.,Rodriguez, E. & Guerrero, C. E., 2010. Pozzolan obtained by mechanochemical and thermal treatments of kaolin. Applied Clay Science, 49, 405-413.
15. Ouhadi, V., PourZafarani, M. (2015). Characteristics change of kaolinite and bentonite due to heat treatment from micro structural aspects. Sharif Civil Engineering, 30, pp. 65-72
16. Little, D.N., (1999). “Evaluation of Structural Properties of Lime Stabilized Soils and Aggregates”, Summary and findings. Prepared for National Lime Association.
17. American Society for Testing and Materials, (2014). "ASTM, 2014, American Society for Testing and Materials, ASTM, Annual Book of ASTM Standards", P.A., Philadelphia V.4, 08.
18. Hesse, P. R., (1971), “A textbook of soil chemical analysis”, William Clowes and Sons, 519p.
19. Ouhadi. V.R., Yong. R.N., (2003). “Experimental and theoretical evaluation of

of cretaceous clays used in the manufacturing of ceramic tiles. Applied Clay 14, 225- 234.

29. Seynou, M., Millogo, Y., Ouedraogo, R., Traore, K., Tirlocq, J., (2011). Firing transformations and properties of tiles from a clay from Burkina Faso. Applied Clay Science. 51, pp. 499 – 502.

30. Bender , W . , Hundle , F., (1982). Brick and Tile Making , Berlin: Bauverlag.

31. Schellbach, G., Jung,E., (1991). Statically and thermally optimized lightweight clay brick of blocks for prefabricated wall panels. Zi-Annual, pp.122-135.

32. Cultrone, G., Sebastian, E., Cazalla, O., De la Torre López, M.J., (1998). Physical, mineralogical and textural features of ceramic clays from Granada Province (Spain), in: C.S.F. Gomes (Ed.), Proceedings of the Second Mediterranean Clay Meeting, Aveiro, Portugal, 16–19 September. pp. 298–303.

33. Elert, K., Cultrone, G., Navaro., C. R., Sebastian Pardo, E., (2003). Durability of bricks used in the conservation of historic buildings. Journal of Cultural Heritage. 4, pp. 91- 99.

34. Afrin. Habiba., (2017), “A review on different types soil stabilization techniques”, International journal of transportation engineering and technology,, Volume 3, Issue 2, PP.20.

35. Joshi, R. C., Achari, G., Horsfield, D., and Nagaraj, T., (1994) "Effect of heat treatment on strength of clays", Journal of geotechnical engineering, vol. 120, p. 1080.

36. Gualtieri, M. L., Gultieri, A.F., Gagliardi, S., RuffIni, P., Ferrari, R., Hanuskova, M., (2010). Thermal conductivity of fired clays: Effects of mineralogical and physical properties of the raw materials. Applied Clay Science. 49, pp. 269- 275.

37. Hamidi, A., Tourchi, S., & Khazaei, C. (2014). Thermomechanical constitutive model for saturated clays based on critical state theory. International Journal of Geomechanics, 15(1), 04014038.

impact of clay microstructure on the quantitative mineral evaluation by XRD analysis”. Elsevier Appl. Clay Sci. J. 23. pp 141.

20. Ouhadi. V.R., Amiri. M., Zangene. M., (2016). “Microstructural Assessment of Lime Consumption Rate and Pozzolanic Reaction Progress of a Lime-Stabilized Dispersive Soil”, Modares Journal of Technical & Civil Engineering, pp 11-22.

21. Abu-Zreig. Majed M., Al-Akhras. Nabil M., & Attom. Mousa F., (2001), “Influence of heat treatment on the behavior of clayey soils”, Applied Clay Science 20, PP. 132-133.

22. Zhang, F., Kong, R., & Peng, J. (2018). Effects of heating on compositional, structural, and physicochemical properties of loess under laboratory conditions. Applied Clay Science, 152, 259-266.

23. Vidonish. Julia E., Zygourakis. Kyriacos., Masiello. Caroline A., Sabadell. Gabriel., & Alvarez. Pedro J. J., (2016), “Thermal treatment of hydrocarbon-impacted soils: A review of technology innovation for sustainable remediation”, Engineering journal. Issue 2, PP. 7.

24. Dellisanti, F. and Valdre, G. (2004). Study of structural properties of ion treated and mechanically deformed commericial bentonite. Applied clay science, Article in press.

25. Cultrone, G.,Rodriguez -Navarro, C., Sebastian, E., Cazalla, O. & De La Torre, M. J., (2001). Carbonate and silicate phase reactions during ceramic firing. European Journal of Mineralogy, 13, pp. 621-634.

26. Singh, M. & Garg, M., (2006). Reactive pozzolana from Indian clays—their use in cement mortars. Cement and Concrete Research, 36, 1903-1907.

27. Trindade, M.J., Dias, M.I., Coroado, J., Rocha, F., (2009). Mineralogical transformations of calcareous rich clays with firing: a comparative study between calcite and dolomite rich clays from Algarve, Portugal. Applied Clay Science. 42, 345–355.

28. Jordan, M.M., Boix, A., Sanfeliu, T., de la Fuente , C., (1999). Firing transformations

Microstructure Evaluation of Thermal Stabilization Marls Case Study: Marl West Bandar Abbas

M. Amiri[1]*, M. Dehghani[1], M. Papi[2]

[1] *Assistant Professor, University of Hormozgan, Faculty of Engineering, Bandar Abbas, Iran.*
[2] *Master Student, University of Hormozgan, Faculty of Engineering.*

Abstract:

Marls are among sedimentary deposits that generally contain 35 to 65 percent of clay minerals and calcium carbonate. The presence of clay minerals in marls has significant effect on reduction of slake durability index of marls. Hence, marls stabilization is important. Furthermore, the presence of carbonate as one of the main components of marls has drastic influence on engineering behavior of soils. Heat, both in transient or constant forms, results in physical, mechanical and microstructural alternation of soils, especially the engineering properties of clay soils. Accordingly, the purpose of this study is to investigate the effect of heat treatment on strengthening parameters of marls, microstructural perspective. Impression of heat treatment on behaviors of marls, using macrostructure tests (Unconfined Compressive Strength, Atterberg Limit, Granularity, Slaking, Water Absorption and Linear Shrinkage) and microstructural tests (pH and X-ray diffraction) have been assessed. For this purpose, the specimens are exposed to heating surfaces (25 to 900 °C). examinations with emphasize on microstructural alternations of marls on specified temperatures and effect of temperature variations on mechanical and strengthening specifications of soil, have been conducted. According to the results, on 700°C marl soils have the best compressive strength of 27.69 Kg/cm^2 and durability against moisture.

Key words: Marls, Thermal Stabilization, Compressive Strength, XRD.